

京都大学工学部 正員 辻本 哲郎
 京都大学工学部 正員 中川 博次
 京都大学大学院 学生員 村上 正吾

1. まえがき 著者のこれまでの研究の結果、とくに非平衡状況での掃流過程に演ずる step length の役割は重要で、これが非平衡流砂過程を明らかにする鍵となっていると言える。しかし step length の定義、その特性は必ずしも十分に明らかにされておらず、ここで著者の種々の実験結果を挙げて議論を整理しておくことにする。step length は Einstein が stochastic model の構成に当り導入した確率変数で、掃流砂の discrete な運動を zigzag model に表現したとき粒子の移動時には時間をそれほど要せず距離のみ増加することに着目して導入されたものである。したがって、そうした現象から、粒子の移動開始から、確実な停止までを一つの step (length) と定義すべきである。

2. 掃流砂の個々の運動特性量と全体としての特性量 ところで、河床波の発生、混合砂床の armoring など砂粒スケールの流砂の非平衡性が問題となる場合、掃流砂モデルとして平衡状態の流砂量式では不十分(不合理)であり、むしろその内部構造に立ち入る必要がある。流砂の運動あるいは流砂量を分割して考える場合、移動砂粒数密度 n_s と移動砂粒速度 v_s 、pick-up rate p_s と step length (平均値 $\lambda = \lambda_d$) の二つの方法があり、いずれもその積で流砂量が評価される。従来の流砂量式もその誘導に際してこれらの量が概念的には考察検討されているが、流砂量としての妥当な評価のみを念頭に置いていたため、これらの構成要素の評価までは必ずしも正当でないものが多い。(非平衡状況の解析を意図して)これらの量の合理的かつ正当な評価を目的としてその実験を試みた。この場合、平衡状態を対象としていては本質的特徴を見逃す恐れがあり、といって一般に非平衡状況は河床条件の場所的変化を伴い、流砂固有の性質は埋もれてしまうことになりがちである。従ってここでは固定床に接続する同一相度の移動床で 16mm フィルム解析による運動特性量を実験した¹⁾(図1~4参照、 $p_{s*} = p_s \lambda_d / (Q/P - 1) q_s$, $n_{s*} =$

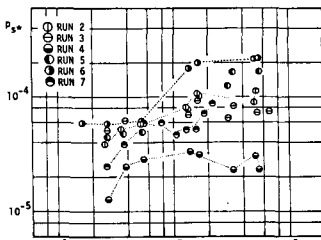


図1 pick-up rateの場所的变化

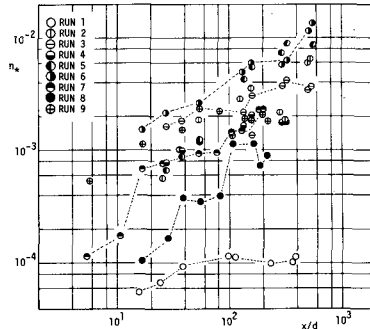


図2 移動砂粒数密度の場所的变化

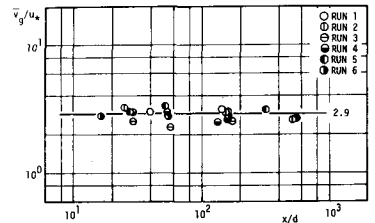
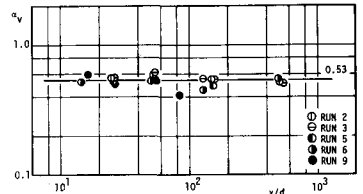


図3 移動砂粒速度の平均の場所的变化



$v_s A_s d^2$)。この結果 pick-up rate, v_s は場所的に殆んど変化しておらず、個々の粒子の運動特性はこの程度の非平衡状況(流砂量は明らかに場所的に増加している)でも保存されることがわかる。これに対し、 n_s は流砂量と同様、個々の粒子運動特性そのものではなく全体としての特性であり、これは場所的に変化している。この結果、pick-up rate、step length のように個々の粒子の運動特性量だけが構成される流砂モデルの方が、その機構を把握・定述するのに適したものと判断できる。

3. 掃流過程の基礎式と step length の役割 著者は pick-up rate と step length を流砂過程(後述するように必ずしも掃流過程に限定する必要はない)の基本的構成要素とし、次のように流砂過程を記述する基礎式^{2),3)}を与えている。

$$p_d(x) = \int_0^{x-x_0} p_s(x-\xi) f_s(\xi) d\xi \quad (1) \quad g_B(x) = (A_3 d / A_2) \int_{x-x_0}^x p_s(x') \int_{x-x'}^{\infty} f_s(\xi) d\xi d x' \quad (2) \quad \frac{\partial h(x)}{\partial t} = \{p_d(x) - g_B(x)\} A_1 d \quad (3)$$
 但し $p_d(x)$: deposit rate, g_B : 流砂量, $f_s(\xi)$: step length の密度関数, x_0 : 流砂の原長 である。なお上式では moving period を無視しており、このことが許容される範囲ではどのような条件でも(河床波の発達した場合、局所洗掘の場合など)、 p_s と

$f_x(x)$ と正當に評價すれば上式は成立する。また浮流砂のように moving period の大きい場合、この効果をとりに式が必要があるが、これについては運動粒子速度の分布関数を導入して上式を改良することもできる。さて、上式より流砂の非平衡性は $p_d(x)$ の変化と

$p_s(x)$ の変化の間の遅れとして現れ、これは step length の分布形に強く依存していることがわかる。 $p_s(x)$ は局所的な水理条件(主として底面せん断力)では一意的に決定されるから、step length が局所状況と下流側と適當な割合(この割合が $f_x(x)$)で西半分、伝播する役割、すなわち非平衡流砂状況で最も重要な役割を演じていることがわかる。なお図5, 6の実験結果($\beta_{pk} = \beta_b / \sqrt{(0.9-1)gd^3}$, $p_{dk} = p_{dk} / \sqrt{(0.9-1)g}$)は、同一相度の固定床・移動床連続部に対して得られたもので式(1), (2)の成立及び平坦河床で step length が指数分布することの検証となっている。^(2), 3)

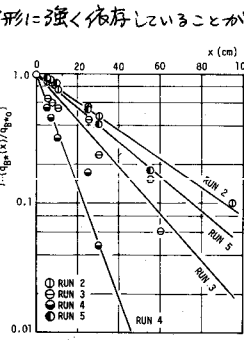


図5 非平衡流砂量

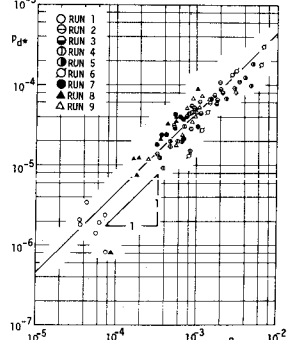


図6 p_{dk} と β_{pk} との関係 (非平衡状態)

4. 平坦河床での step length の大きさ

合理的な流砂モデルの確立には step length の評価が必須であるが、その平均値を力学的に推定するのが相当困難となっている。これは step length が単一の saltation の飛距離のように孤立粒子の単一の運動方程式の解で与えられるようなものでなく、運動中砂れきの偶然的な停止で決定されるような確率的なものである。ところで従来のトレーサ実験による step length の測定結果(個々の step の直接測定及び平均分散距離と p_s の実験値からの間接的測定)は図7に示す通りでは粒径の50~200倍である。そこで平衡状態の流砂量は構成要素の各々の評価にもついても例えは Bagnold のようにエネルギー的考察などから推定し得る。従来の流砂量式(A): スイス公式;

(B), (C): Bagnold 式(但し $\tau_{*c} = 0.04, 0.045$);
(D) 菊道式⁽⁴⁾を認めて平均 step length を逆算した**結果でも平均 step length はこの程度の値であることが予想され、かつて中川⁽⁵⁾が指摘しモデル化しようとした傾向を類推できる。(** $L/d = (A_2/A_3) \beta_{pk} / \beta_{*}$, ただし中川⁽⁵⁾より, $\beta_{*} = 0.03 \{1 - (0.035/\tau_{*})\}^3$, 図8参照)

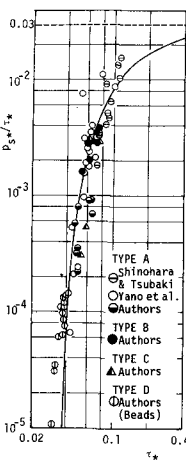


図8 pick-up meter 推定式と実験値

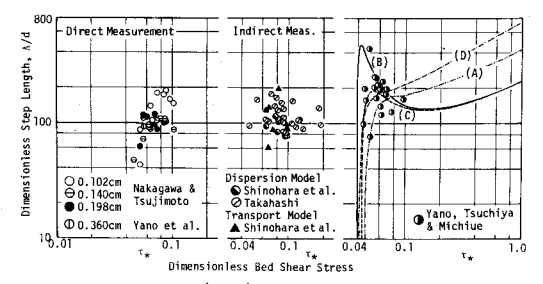


図7 平均 step length の大きさ

5. 掃流砂れきの運動機構と step length

前述したように step length は掃流砂れきの偶然的な停止で決定され、これは床面の突起砂粒との衝突による粒子速度の急減に起因する。このような衝突の繰り返しは卓越する不規則過程としての掃流機構の内部構造は前報で詳しく調べられた。その結果として明らかにされた流送過程、床面不規則性状及び衝突過程のモデルを用いて、移動を開始した後の掃流砂れきの運動を数値的にシミュレーションすることができ⁽⁷⁾、その結果の一例が図9に示される。このようにシミュレーションから得られる step length の分布(解析的に表示することも可能⁽⁷⁾)を図10に示した。この結果としての平均 step length はせいぜい粒径の50倍程度、変動係数は約0.8で、さらに衝突後速度零の砂の継続移動が認められる。これについて今後検討を加える。

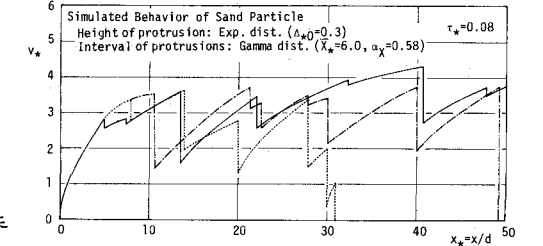


図9 掃流砂運動のシミュレーション例

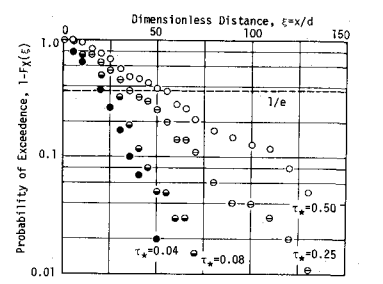


図10 シミュレーション結果から得られる step length の超過確率

<参考文献> 1) 中川, 土木学会 流砂研究報告, 1978. 2) 中川, 土木学会 論文報告集 No. 291, 1979. 3) 土木学会: 34周年誌, 1979. 4) 菊道, 土木学会 論文報告集, 1972. 5) 中川, 土木学会 論文報告集, 1975. 6) 細川, 土木学会 34周年誌, 1979. 7) 中川, 土木学会: 24周年誌, 1980.